

2. Belvíz elöntések nagy pontosságú térképezése és monitorozása

Tobak Zalán, van Leeuwen Boudewijn, Kovács Ferenc, Szatmári József

Bevezetés

Csapadékos periódusokban a lefolyástalan területeken a beszivárgás és a párolgás által el nem vezetett fölösleges vízmennyiség, illetve a magasabb területekről a felszín alatti lefolyás által táplált talajvíz a felszínen sekély elöntések formájában megjelenik. Ez az időszakosan előforduló vízborítás, belvízelöntés (inland excess water) a Kárpát-medence alföldi területein komoly gazdasági, környezeti és szociális problémák forrása.

A belvízelöntések térképezése 3 okból kifolyólag is nagyon fontos: (1) segít megérteni a belvíz kialakulását elősegítő tényezők kapcsolatát, (2) az elöntések helyének és méretének ismeretében lehetővé válik a vízelvezetési és a további károk megelőzését célzó operatív tevékenység, valamint (3) előre jelezhetővé válik a jövőbeli elöntések helye, mérete és kiterjedése, ami a megelőzési folyamatokhoz nyújthat támogatást (Szatmári és van Leeuwen, 2013).

Az elöntések térképezésére és monitoringjára 4 általános megközelítést alkalmaznak: (1) a terepi felvételezés rendkívül időigényes, hibákkal terhelt, drága és az eredmény térképek gyakran pontatlanok. (2) A belvíz kialakulásában szerepet játszó tényezők földrajzi információs rendszerbe (GIS) integrálásával veszélyeztetettségi térképek készíthetők ugyan, de az aktuális elöntések ezzel a módszerrel nem adhatók meg (Pálfai, 2003; Bozán et al., 2005; Bozán et al., 2009; Pásztor et al., 2014). (3) A belvízképződés hidrológiai folyamatát leíró komplex modellek nagy mennyiségű input adatot igényelnek, regionális léptékben ezért hatékonyan már nem alkalmazhatók. (4) A műholdas vagy légi távérzékeléssel gyűjtött adatok nagy területről, jól automatizálható feldolgozási és kiértékelési műveletsorral szolgáltatnak információt, így optimális megoldást kínálnak a belvízelöntések regionális szintű, operatív térképezésére. Ez utóbbi megközelítésen belül az elmúlt 30 évben több kutatást végeztek légifelvételek (Liczkó et al., 1987; Rakonczai et al., 2003; van Leeuwen et al., 2012), multispektrális műholdképek (Csornai et al., 2000; Rakonczai et al., 2001; Mucsi and Henits, 2010; van Leeuwen et al., 2013) és hiperspektrális adatok (Csendes and Mucsi, 2016) felhasználásával. A passzív, optikai szenzorok mellett megszülettek az első tapasztalatok az aktív, radar adatok alkalmazhatóságáról is (Csornai et al., 2000; Csekő, 2003; Gálya et al., 2016; Gulácsi és Kovács, 2019).

A műholdfelvételek operatív alkalmazását nagyban elősegítette a megfelelő térbeli felbontású (min. 10-30 m), szabadon hozzáférhető és egyre jobb visszatérési idővel rendelkező földmegfigyelő műhold rendszerek kiépülése. Az Európai Űrügynökség (ESA) Copernicus programjának keretében 2014-től indított Sentinel műholdcsalád változatos alkalmazási területek igényeit szolgálja, többek között multispektrális és

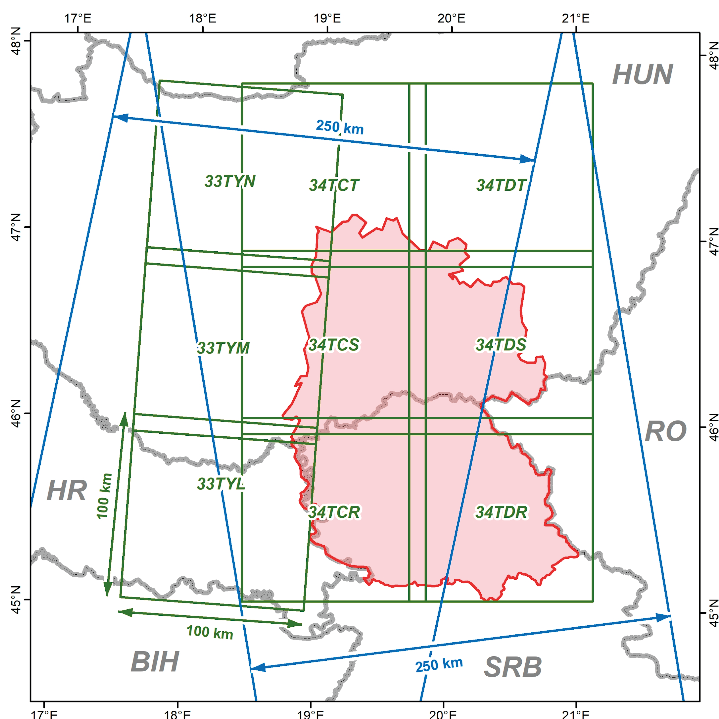
radar felvételek formájában (Malenovský et al., 2012). A Sentinel 1A és 1B műholdak aktív szenzorai időjárási körülményektől függetlenül radar, a Sentinel 2A és 2B műholdak pedig multispektrális adatokat szolgáltatnak heti 2-3 alkalommal.

A Water@Risk projekt keretében kifejlesztett munkafolyamat Sentinel 1 és Sentinel 2 műholdfelvételeket felhasználva képes operatív módon regionális léptékű, heti gyakoriságú belvíz elöntési térképek előállítására.

Mintaterület és adat

A Water@Risk projekt mintaterülete Magyarország 2 dél-alföldi megyéjére (Bács-kiskun és Csongrád), valamint Szerbia Vajdaság tartományára terjed ki. A térség domborzati viszonyai, az alacsony relief, éghajlati adottságai és talajainak karakterisztikája mind kedveznek a belvíz kialakulásának. A terület nagy része mezőgazdasági művelés alatt áll, így a gazdasági károk mértéke sokszor jelentős.

A teljes mintaterületet (kb. 27000 km²) 3 felszálló és 2 leszálló Sentinel 1 pászta és 9 db Sentinel 2 csempe fedi le (2.1. ábra).



2.1. ábra Sentinel 1 pászták (kék) és Sentinel 2 csempék (zöld) a mintaterületen

A belvíz elöntési térképek Sentinel 1 és Sentinel 2 műholdak adatai alapján készülnek.

Sentinel 1

A radar alapú feldolgozási részfolyamat Sentinel 1A és 1B felvételeket használ fel. A két műhold a mintaterületről kb. minden harmadik napon teljes lefedést ad, mindent a C-sávú aktív távérzékelési technológiának köszönhetően napszaktól és időjárási körülményektől függetlenül. Az ESA szervereiről szabadon letölthető Level-1GRD termékek képezik a bemeneti adatot. A szenzor ún. Interferometric Wide (IW) módban a felszín 250 km széles sávjában 20x10 m térbeli felbontású felvételt állít elő (Malenovský et al., 2012). Az adatcsomagok a függőleges-függőleges (VV) és függőleges-vízszintes (VH) polarizációjú réteget egyaránt tartalmazzák, melyek mind felhasználásra kerültek a radaros munkafolyamatban. Jelen vizsgálat során a 2018. március 26 – április 1. (13. hét) és 2018. április 2 – 8. (14. hét) között készült Sentinel 1 adatokat használtuk fel (2.1. táblázat)

2.1. táblázat A felhasznált adatok összefoglaló paraméterei

| Adatforrás | Dátum (termékek száma) | Térbeli felbontás / Területi lefedés / Méretarány | Spektrális felbontás / Tematika |
|------------|--|---|--|
| Sentinel 1 | | | |
| 13. hét | 2018.03.28. (3) 2018.03.29. (5) 2018.03.30. (4) 2018.03.31. (3) | 20x10 m / 250 km szélesség | C-sáv (5,405 GHz) |
| 14. hét | 2018.04.03. (2) 2018.04.04. (5) 2018.04.05. (2) 2018.04.06. (3) | | |
| Sentinel 2 | | | |
| 13. hét | 2018.03.28. 2018.03.31. | B2: 10m B3: 10m B4: 10m B5: 20m B6: 20m B7: 20m B8: 10m | B2: 492,4 / 492,1 nm B3: 559,8 / 559,0 nm B4: 664,6 / 664,9 nm B5: 704,1 / 703,8 nm B6: 740,5 / 739,1 nm B7: 782,8 / 779,7 nm |
| 14. hét | 2018.04.02. 2018.04.03. 2018.04.05. 2018.04.08. | B8A: 20m B11: 20m B12: 20m 100x100 km csempék | B8: 832,8 / 832,9 nm B8A: 864,7 / 864,0 nm B11: 1613,7 / 1610,4 nm B12: 2202,4 / 2185,7 nm |

| Adatforrás | Dátum (termékek száma) | Térbeli felbontás / Területi lefedés / Méretarány | Spektrális felbontás / Tematika |
|---|---------------------------|---|--|
| Légifelvétel | 2018.03.28. | 10 cm / 20 km² | valós színes (RGB) |
| CORINE Land Cover | 1998 / 2018 | 1:50000 / 1:100000 | állandó vizek / vízenyős területek / mesterséges felszínek |
| High Resolution Layers | 2009-2015 | 20 m | állandó és időszakos vizek és vízenyős területek |
| Google Earth (GeoEye / Pleiades) | 2017-2018 | 0,41 / 0,5 m | valós színes (RGB) |
| OpenStreetMap | változó | - | városi területek, utak, vasutak, állandó vizek |

Sentinel 2

A Sentinel 2A és 2B műholdak 5 napos visszatérési idővel szolgáltatnak multispektrális felvételeket. A látható (VIS), közeli infravörös (NIR) és rövidhullámú infravörös (SWIR) tartományban összesen 13 sáv áll rendelkezésre, melyek térbeli felbontása 10-20-60 m (2.1. táblázat). Az ESA szervereiről 100x100 km kiterjedésű csempék formájában szabadon letölthető Level-2A termékek már az atmoszféra zavaró hatásaitól mentes, felszíni reflektancia értékeket tárolnak. Az optikai adatokon alapuló munkafolyamatokban ezen adatcsomag 10 sávját (B2-B3-B4-B5-B6-B7-B8-B8A-B11-B12) és a felhőborítási információkat is tartalmazó ún. scene-classification réteget használtuk fel. Jelen kutatás keretében a 2018. március 28-án és 31-én, illetve április 2-án, 3-án, 5-én és 8-án készült Sentinel 2 felvételeket dolgoztuk fel (2.1. táblázat).

Kiegészítő adatok

Mind a radar, mind az optikai felvételeken alapuló munkafolyamat igényel kiegészítő adatokat. Ezek egyrészt referenciaként az algoritmusok tanításában játszanak szerepet, másrészt pontosítják a eredményül kapott belvízelöntési térképet azon területek kimaszkolásával, amelyeken belvíz – definíció szerint – nem fordulhat elő. A referencia állományt alkotó nyílt vízfelületek az 1:50000 és 1:100000 méretarányú CORINE Land Cover, valamint a pán-európai nagyfelbontású rétegek (High Resolution Layers – HRS) állandó víz felületeiből származnak (Büttner et al., 2014), melyek a Google Earth nagyfelbontású felvételei segítségével aktualizálásra és pontosításra kerültek (2.1. táblázat). A maszk állomány városi területeket, a mezőgazdasági térségek mesterséges felszíneit, utakat, vasútvonalakat, tavakat, folyókat – és ez utóbbiak töltései által határolt ártereket –, valamint vizes élőhelyeket tartalmaz, melyek CORINE és OpenStreetMap adatbázisokból kerültek kinyerésre. A Sentinel

2 felvételekről a feldolgozás elején kizárásra kerültek továbbá a felhő maszk rétege alapján körülhatárolt felhős vagy felhő árnyékkal fedett területek.

Légifelvételek

Az eredmények validálásához légi távérzékelési adatokat gyűjtöttünk. Ehhez Cessna 172 típusú kisrepülőgépen, illetve eBee X merevszárnyú drónon elhelyezett szenzorok álltak rendelkezésünkre: 60 MP felbontású PhaseOne P65+, illetve 20 MP-es senseFly S.O.D.A. RGB kamerák, valamint 1,2 MP felbontású Parrot Sequoia+ multispektrális szenzor. A légifelvételezést a teljes mintaterület egy Szentestől ÉK-re kiválasztott, kb. 20 km²-es részén végeztük el 2018. március 28-án, 10 cm térbeli felbontással. Az egyedi képekből ortofotó mozaik készült.

Módszer

A bemutatott belvizelelöntés térképezési módszertan előfeldolgozási és feldolgozási lépésekből áll. Utóbbi csoporton belül elkülönül egymástól egy radar és két multispektrális felvételekre épülő algoritmus, melyek eredményeiből egy integrációs lépésben elkészül a bináris elöntési térkép. A jól automatizálható, ezáltal operatív módon alkalmazható módszer nem kategorizálja tematikusan a különböző típusú belvizeket, azonban heti gyakorisággal és közepes felbontásban (10 m) szolgáltat elöntési információkat.

Előfeldolgozás

Az előfeldolgozás során automatizált módon – OpenSearch API-t és OpenData API-t használva – megtörténik a Sentinel 1 GRD, illetve Sentinel 2 L2A termékek mintaterületet érintő részleteinek letöltése az ESA szervereiről.

A Sentinel 1 radar felvételek komplex geometriai és radiometria előfeldolgozást igényelnek, amely magában foglalja a radiometria kalibrációt, a zajszűrést, a felszíni domborzat és az oldalra néző felvételezési geometriából származó torzulások korrekcióját, valamint az ún. helyi beesési szög korrigálást (van Leeuwen et al. 2017). Az így kapott raszteres állományok 10x10 m pixelei a felszínről visszaszórt radar jel dB értékeit tárolják.

A Sentinel 2 optikai adatai már részben előfeldolgozott formában (Level2A), felszíni reflektanciát tárolva kerülnek letöltésre. A 13 felvételi sávból 10 sáv került kinyerésre, majd átmintázásra egységesen 10 m felbontásra. A különböző típusú felhőzet, illetve felhőárnyék által kitakart területeket minden műholdképen kimaszkoltuk. Ehhez az ún. scene classification réteget használtuk fel, melyet a letöltött adatcsomag tartalmazott.

A feldolgozást mindkét adatforrás esetében csak a belvíz által veszélyeztetett területekre (Pálfai, 2003) szűkítettük le.

A műholdképek előfeldolgozása az ESA SNAP (Sentinel Application Platform) szoftverében, modellek futtatásával valósult meg.

Feldolgozás

Radar adatok küszöbérték alapú kiértékelése

A nyílt vízfelületeket ábrázoló referencia réteg alapján a VV és VH sávokból kinyerésre kerültek a vízborítású térszínek alapstatisztikái (dB értékek minimuma, maximuma, átlaga, szórása). Ezt felhasználva történt meg nyílt vizeket kijelölő küszöbértékek definiálása. Mivel a radar jelek visszaverődése a vízfelületről – hullámozást, örvénylést nem feltételezve – alacsonyabb, mint más felszínekről, ezért a küszöbérték alatti képelemeken feltételezhetően vízborítás van jelen.

Multispektrális adatok automatikus osztályozása

A Sentinel 2 felvételeken ISODATA osztályozást hajtottunk végre, melynek eredmény osztályait a referencia területek átlag spektrumával vetettük össze. A spektrális hasonlóságot a 10 felvételi sáv által kijelölt 10 dimenziós térben mért szögeltérés alapján számszerűsítettük (Kruse et al., 1993), majd az osztályokat sorba rendeztük és közülük a legkisebb eltérést – azaz legnagyobb hasonlóságot – mutatókat vízborítású címkével láttuk el. Eredményül ez esetben is bináris (van vízborítás | nincs vízborítás) előntési térképet kaptunk.

Spektrális index számítás

A multispektrális felvételek alapján MNDWI (Modified Normalized Differential Water Index) kalkulációt végeztünk, melyhez a látható zöld (B3) és egy rövidhullámú infravörös (B11) sávot használtunk fel (1. és 2. egyenlet) (Xu, 2005). Az index térképen a referencia területekre számított index értékek alap statisztikái segítségével küszöbértéket definiáltunk, amely alkalmas volt a vízzel borított területek lehatárolására. Az eredmény ebben a rész munkafolyamatban is bináris előntési térkép.

$$MNDWI = \frac{\rho_{green} - \rho_{SWIR}}{\rho_{green} + \rho_{SWIR}} \quad (Eq. 1)$$

ami a Sentinel 2 sávjait felhasználva az alábbiak szerint alakul:

$$MNDWI_{Sentinel-2} = (3^{rd} \text{ sáv} - 11^{th} \text{ sáv}) / (3^{rd} \text{ sáv} + 11^{th} \text{ sáv}) \quad (Eq. 2)$$

Integráció

A radaros, valamint a multispektrális rész munkafolyamatok bináris eredmény térképeit utolsó lépésben integráltuk. E térképek számát a vizsgált időintervallumon, egy-egy héten belül elérhető és feldolgozható műholdfelvételek száma határozza meg. Az integrált elöntési térképekhez így megbízhatósági paraméter is csatolható, megadva, hogy egy adott képelemen az összes elérhető input adat és feldolgozási rész munkafolyamat milyen arányban jelzett vízborítást.

Validálás

Az integrált elöntési térképek validáláshoz légi adatgyűjtésből kinyert belvíz foltokat használtunk fel. A közel 20 km²-es területen keresztábla módszerrel értékeltük az in-situ megfigyelt és a feldolgozási lépéssor által prediktált vízborítás kapcsolatát.

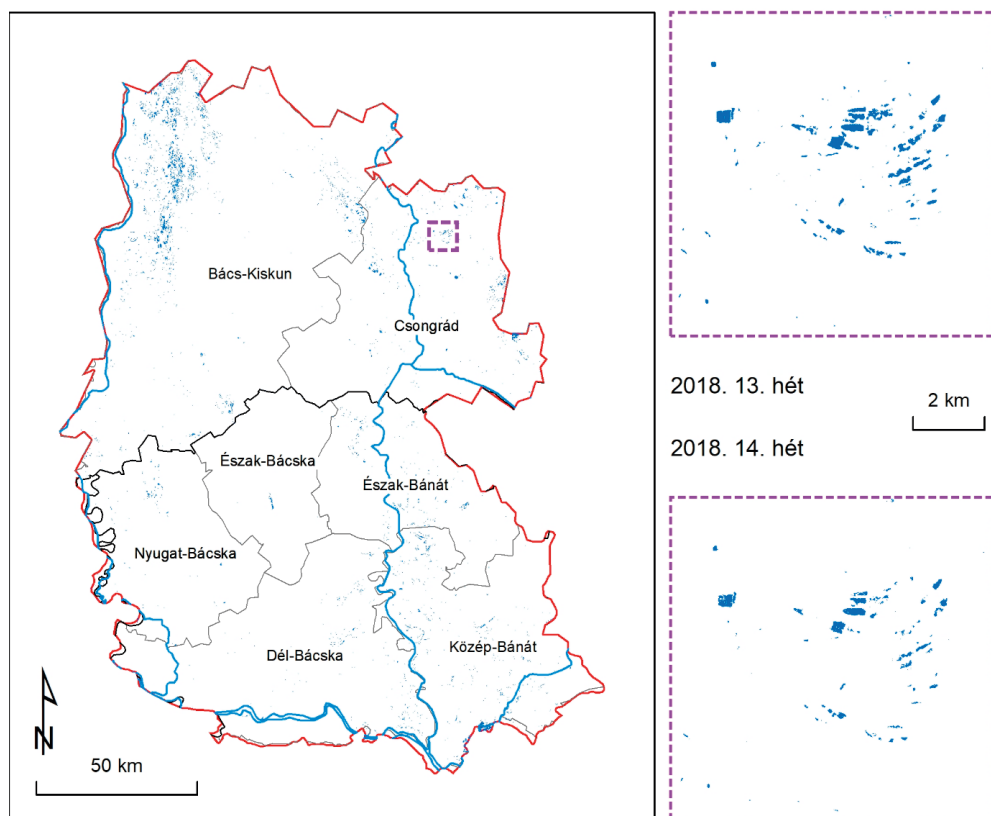
Eredmények

Belvíz elöntési térképek

2018 tavaszán a mintaterületen jelentős belvízelöntés volt. Az alábbiakban 2 kiválasztott hét (13. hét: 2018. március 29 – április 1 / 14. hét: 2018. április 2 – 8.) Sentinel felvételei alapján generált elöntési térképeket mutatjuk be (2.2. ábra). A 13. héten összesen 42 (15+27), a 14. héten pedig 33 (12+21) termék került feldolgozásra.

Az eredmények megbízhatóságának növelése érdekében csak azokat a képelemeket tekintettük vízzel borítottak, melyeken a feldolgozó algoritmusok az elérhető felvételek legalább 40%-ában elöntést jeleztek.

A teljes területen 17800, illetve 10990 ha vízborítást detektáltunk. A leginkább érintett részek Bács-Kiskun megye ÉNy-i fele – ahol döntően természetes vizes élőhelyek kerültek detektálásra -, valamint a Tisza mente Magyarországon és Szerbiában egyaránt, ahol főként szántóföldi művelést veszélyeztetett a belvízelöntés. Időben megfigyelhető, hogy a 14. hétre kis mértékben csökkent az elöntött területek kiterjedése (2.2. ábra).



2.2. ábra Belvívelőntés a mintaterületen 2018. március végén / április elején

Validálás

A módszer validálásához felhasznált referencia adatok 2018. március 28-án (13. hét) végzett légifelvételéből származnak. A keresztátlából kiolvasható értékek alapján a munkafolyamat által jelölt elöntések 93,6%-ban valós belvívzfoltokat jelölnek (user accuracy, true positive), a felülbecslés mértéke mindössze 6,4% (commission error, false positive) (2.2. táblázat). Meg kell azonban említeni, hogy – elsősorban a bemeneti adatok és a terepi felvételzés eltérő felbontása, valamint a referencia térkép létrehozásának szubjektív tényezői miatt – a referencia belvívzfoltoknak csak 5,4%-át sikerült az eredmény rétegen megjeleníteni. Az alulbecslés (omission error, false negative) mértéke tehát igen jelentős.

2.2. táblázat A belvítérkép validálásának eredménye a 13. heti felmérések alapján

| | | | | | | |
|-----------|--------------------------------|--------------|--------------|-----------------------------|-----------|-----------------|
| 13w | Producer Accuracy: 5,42 | | | User Accuracy: 93,58 | | |
| | Alulbecslés: 94,58 | | | Felülbecslés: 6,42 | | |
| | Referencia | | | Referencia | | |
| | | | | | | |
| Detektált | | nyílt belvíz | egyéb belvíz | nincs víz | | |
| | nincs víz | 94,55 | 99,97 | 98,58 | nincs víz | 6,88 3,39 89,72 |
| | belvíz | 5,42 | 0 | 0,03 | belvíz | 93,58 0 6,42 |
| | maszk | 0,03 | 0,03 | 1,39 | maszk | 0 0 0 |

Diszkusszió és következtetések

A kifejlesztett belvizeleöntés detektáló módszertan radar és optikai, multispektrális műholdfelvételeket feldolgozva szolgáltat heti rendszerességgel elöntési információkat. A munkafolyamat minden lépésében automatizálható, így alkalmas operatív felhasználásra is.

A módszer limitációi elsősorban a bemeneti adatok jellegzetességeire vezethetők vissza: (1) az eredmény térkép térbeli felbontása természetesen nem haladja meg a bemeneti adatok felbontását (max. 10 m), így reálisan csak az ezt kb. egy nagyságrenddel meghaladó kiterjedésű foltok azonosítása biztosított. (2) Az optikai adatok esetén a felhőborítás éppen a belvizes időszakokban a legnagyobb, így gyakran adathiány akadályozza a teljes területi lefedést. (3) A visszavert radar jelek erőssége nagy szórást mutathat a különböző érdességű – hullámzó vagy sima – vízfelületek esetében, így az alkalmazott küszöbértékek pontos definiálása nehezen kivitelezhető. A felszínborítás és a talajtípus szintén jelentősen befolyásolja a rajta kialakult belvíz folt radar jelének intenzitását.

A módszer nem tesz különbséget a száraz talaj, a nyílt belvíz, a vízben álló növényzet és a vízzel telített talaj között, a bináris eredmény térképen csak nyílt vízfelület és száraz talajfelszín kategóriák jelennek meg. A vízben álló növényzet és a telített talajok azonosításához további input adatokra lenne szükség, melyek beépítése az erőforrásigény mellett korlátozhatja a munkafolyamat automatizálhatóságát is.

További fejlesztést igényel a radar feldolgozási eljárás küszöbértékeinek finomítása és kalibrálása különböző felszínborítású, illetve talajú területeken. A multispektrális

felvételek felhő maszkjának pontosítása szintén sok kihívást tartogat. Ezek jövőbeli megvalósulásával a belvizes területek felülbecslése tovább csökkenthető.

A validálási módszertan fejlesztése is szükséges: szorgalmazni kell a műholdfelvételek készítésével megegyező napon történő terepi és légi adatgyűjtést, illetve a légifelvételek interpretálásának egységesítését.

A kifejlesztett eljárás segítségével lehetővé válik a rendszeres, nagy kiterjedésű – regionális vagy akár országos léptékű – belvíz elöntés térképezés, amely az automatizálás eredményeként már alkalmas operatív felhasználásra.

Összegzés

A korábbi belvíz térképezési eljárások egy adott időpont terepi felméréseire, esetleg légi vagy műholdfelvételeire épültek. A projekt keretében kifejlesztett módszer ugyanakkor alkalmas a folyamatos, nagy kiterjedésű és operatív célú belvívelöntés detektálásra. Az elmúlt években elérhetővé vált radar és optikai műholdfelvételek felbontásukkal egyre jobban közelítik a belvíz jelenség tér- és időbeli léptékét, kínálva ezáltal új lehetőségeket és egyben kihívásokat is. Az automatizált munkafolyamat eredmény térképei a nemzeti vízügyi hatóságok kárenyhítési munkálatait támogatják, a mai napig alkalmazott terepi felmérések eredményeit kiegészíthetik, illetve pontosíthatják.

Köszönetnyilvánítás:

A kutatást a WATERatRISK (HUSRB/1602/11/0057) és az NKFIH 124648K azonosítójú projektek támogatták.